认知灵活性对概率类别学习的影响*

冯霞[1] 冯成志[2]

（[1]南通大学教育科学学院，南通 226019 ）（[2]苏州大学心理系，苏州 215123）

摘要 本研究采用“数字-字母转换任务”区分高低认知灵活性者，构建概率配对模式相同但形式不同的两个概率类别学习任务，借助 ERP 技术探讨认知灵活性对概率类别学习任务的作用特点与机制。结果发现，本研究的两个任务中，高认知灵活性组的规则习得水平均优于低认知灵活性组，认知灵活性能促进概率类别的学习。同时，对不同学习阶段的 ERPs 分析结果显示，高认知灵活性者在概率类别学习中的优势源于反馈加工过程。

关键词 认知灵活性，概率，规则学习，反馈相关负波（FRN），P300

1 引言

认知灵活性是执行功能的重要成分，是在抑制控制和工作记忆基础上发展起来的(Diamond, 2013)，指随环境变化做出改变的能力，包括面对不相关变化时保持活动性的能力，强调的是改变原有视角，从多角度理解对象。它与任务转换、创造性等概念有很大的重叠(Diamond, 2013)。高级认知过程，如问题解决、创造性思维等离不开认知灵活性的重要促进作用，研究表明，能根据任务需求灵活地调整自身的认知抑制水平(白学军, 姚海娟, 2018)，能灵活地进行思维模式转换(何李 等, 2020)是高创造性个体的特征。探索问题解决过程中认知灵活性发生作用的机制对理解高级思维过程和发展有效的促进性训练方法有重要帮助。

在高级思维过程（如推理任务）中，学习的有效性依赖于将选择和强化进行持续整合，从“刺激-选择-反馈”中建立抽象的 S-R 规则联结。研究发现高灵活性者和低灵活性者在多种涉及高级思维的任务中有差异性表现，在归纳推理任务中，高低灵活性儿童的学习潜力不同，相对于高灵活性者，低灵活性儿童需要更多的分步提示以达到相似的学习效果(Stad et al., 2019)；在模糊决策，如爱荷华赌博任务(Iowa Gambling Task, IGT)中，高灵活性者获得了更多与任务有关的外显

收稿日期：2021-07-21

*本研究得到教育部人文社科项目（17YJA880019），江苏省教育科学“十四五”规划项目(B/2021/01/82)，江苏省双创博士项目(JSSCBS20211080)资助。

通信作者：冯成志，E-mail: fengchengzhi@suda.edu.cn

知识，且在决策加工的选择评价、反应选择和反馈加工中均存在优势(Dong et al., 2016)。模糊决策本质上是一种不确定情境下的决策，是一种概率学习。研究还通过“概率类别学习(probabilistic category learning)”范式来研究线索与结果间非确定性关系知识经验的获得，这一类任务中同时包含了概率、分类及规则的属性(Craig et al., 2011; Schenk et al., 2017; 李开云 等, 2012)。研究发现，在概率类别学习中，智商水平高的青少年被试，积极反馈后能生成更具适应性的学习策略，且背外侧前额叶和背侧前扣带皮层激活程度增加(Bos et al., 2012)。智力与包括认知灵活性成分在内的执行功能间有千丝万缕的联系(Alfonso & Lonigan, 2021; Allan et al., 2014)。基于上述研究结果推测，学习者自身的认知灵活性对概率类别学习存在影响。

类别学习中线索的作用也受到研究者们关注(Newell et al., 2007; 李开云 等, 2012; 徐贵平 等, 2011)，对线索特征的探讨为回应概率类别学习的外显和内隐系统之争提供了证据。高预测性线索能提高学习者的表现，这种反应模式不依赖于刺激的呈现时间，而受限于线索和目标之间的概率匹配关系(Girardi et al., 2013)。本研究从概率类别学习中有无线索的角度关注线索对学习效果影响的作用。前人利用转换任务发现，对外显线索的有效利用会减少转换代价，促进对特定反应规则的准备(Koch & Allport, 2006)。有研究关注了在不同概率提示线索下，特殊人群（如强迫倾向人群）的认知加工特征，结果显示，高强迫倾向者易固着于原来的加工方式，低倾向个体会根据概率变化条件调整加工范式(苗小翠 等, 2015)。认知灵活性本质上体现个体的抑制控制和认知转移能力，能抑制占优势地位的无效线索，高效地重新配置资源(Lange et al., 2015)。本研究针对正常群体，探讨在有线索的概率类别学习中，高认知灵活性者是否能更好地利用线索，促进学习。

借助事件相关电位技术高时间分辨率的优势，对概率类别学习分阶段考察，利于探索不同阶段的学习特点，拓展研究深度。Zeithamova 等(2007)提出，基于规则的类别学习至少包括两个过程：类表征和类标准，即知觉刺激、形成类别表征，以及反馈加工、形成类别标准。Dong 等(2016)在模糊决策研究中将以上两阶段进行了拓展，将学习分成涉及刺激知觉、风险选择和反馈学习的选择评价、反应选择和反馈加工阶段，并在这三个阶段中均发现了高认知灵活性者的优势：高认知灵活性组对刺激有更强的记忆能力、对任务形成了概念化知识、且对奖赏刺激形成预期。借鉴以上研究，本研究利用 ERP 技术探讨概率类别学习选择评价和反馈加工阶段的特点。

以往研究中，衡量认知灵活性水平常用的实验任务有威斯康星卡片分类任务(Wisconsin Card Sorting Test, WCST)(Dong et al., 2016)和转换任务(Deák & Wiseheart, 2015; Erb et al., 2017)。研究指出，转换任务对认知灵活性的测量更纯粹(Lange et al., 2018; Lange et al., 2017)。而且，相对于衡量指标众多、关键指标未在研究间达成一致的 WCST 任务(Feng & Feng, 2019)而言，转换任务中“转换代价”的测量在各研究间基本统一，也易于解读与理解。因此，本研究以转换任务中的转换代价作为区分不同认知灵活性水平被试的依据，以 Rogers(1995)的“数字-字母转换任务”为具体实施任务。此外，以往关于认知灵活性的研究多集中在儿童和青少年群体。原因之一可能是这些群体的认知灵活性尚处于发展中，有较大的干预和提升空间。而处于成人初期的大学生，认知灵活性、流体智力水平等特征已趋于稳定，更适合用于比较不同认知灵活性水平者之间的学习特点，以揭示认知灵活性对学习（尤其是高级思维学习过程）影响的一般性特征。

综上，本研究拟进一步探讨三个问题：①认知灵活性对概率类别学习是否有影响？②认知灵活性对概率类别学习的作用是否受任务线索的影响？③认知灵活性主要对概率类别学习的哪个阶段产生影响？为回应前两个问题，本研究中设置了两个概率配置相同，但线索特征不同的概率学习任务进行比较。针对第三个问题，本研究采用了高时间分辨率的事件相关电位技术对学习过程进行分段考察。

2 研究方法

2.1 被试

在高校内通过线上、线下渠道发布招聘信息，310 名在校大学生参加认知灵活性评定的“数字-字母转换任务”。13 人因不断重复一个反应或对指导语理解错误或反应时过短（小于 100ms），数据被删除，未参加后续实验。剩余 297 名被试中，男 60 人，所有被试的平均年龄为 18.7±1.5 岁，均未参加过与本研究相同的实验任务。根据“数字-字母转换任务”的成绩和本人参加脑电实验的意愿，共 76 人参加本研究的脑电实验。所有视力或矫正视力正常，右利手，无认知障碍，无精神疾病史。该研究获苏州大学伦理委员会批准，所有被试在实验前均签署知情同意书，在实验完成后获得相应的报酬。

2.2 研究任务

2.2.1 数字-字母转换任务

采用经典“数字-字母转换任务”范式，即在刺激出现的田字格区域，每次呈现一个字母（元音 A/E/I/U 或辅音 G/K/M/R）和一个数字（奇数 3/5/7/9/或偶数 2/4/6/8/）组成的混合刺激。告知被试，当刺激出现在田字格上方两格时，按 E 或 I 键判断字母是元音或辅音；田字格下方两格时，按 E 或 I 键判断数字是奇数或偶数。被试练习正确率达到 80%以上，才能进入正式实验。正式实验共 128 次判断。

记录反应时和正确率，以反应时转换代价作为区分高灵活性者和低灵活性者的依据。反应时转换代价通过转换试次中正确反应的平均反应时与非转换试次中正确反应的平均反应时求差而获得。

2.2.2 瑞文推理测验

为衡量被试的智力水平，控制智力因素对实验结果的干扰，本研究采用简版瑞文推理测验施测。共 20 题，每题答题时间 90 秒，答对记 1 分，答错或超时记 0 分。

2.2.3 无线索的概率类别学习任务——图片选择任务

图片选择任务中，白色刺激材料呈现在黑色背景上。实验材料是ᗴ，ᗰ，ᗱ，ᗯ 4 种，每种刺激匹配一种获奖概率：0、1/3、2/3、1。对每种刺激可能的获奖概率进行拉丁方设计，共四种获奖模式在被试间平衡。每个试次的流程如图 1 所示。

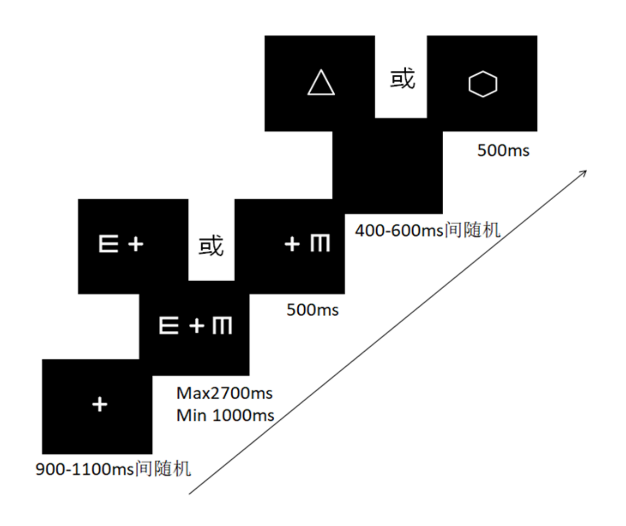


图 1 图片选择任务实验流程图

被试的任务是按 F/J 键选择左侧/右侧的刺激更可能带来奖励，三角形和六边形反馈分别代表有奖或无奖（被试间平衡）。实验中设置了四种（0-1/3、 0-2/3、1/3-2/3、 1-1/3）概率配对水平，每种概率水平包含的试次数如表 1 所示。实验共包括 540 个试次，每完成 45 个试次休息一下。实验前告知被试，实验中收获得奖反馈的次数越多，实验完成后的实际奖励越大。实验前不透露被试任何关于概率的信息，对刺激概率信息的感知，以及两两比较时优势选项的辨别需通过反馈信息的不断积累而获得。实验完成后要求被试估计当四种刺激单独出现时，它们带来奖励的可能性。

表 1 两侧刺激的概率配对关系

刺激概率配对		试次数量(含左右平衡)
一次刺激获奖概率	另一侧刺激获奖概率	
0	1/3	120
0	2/3	90
1/3	2/3	240
1/3	1	90

2.2.4 有线索的概率类别学习任务——硬币搜索任务

硬币搜索任务参考 Bellebaum 等(2008)的实验任务。刺激呈现在黑色背景上，注视点左右两侧各 12 个色块，告知被试 12 个色块中各藏有一个硬币会给你带来奖励，按 F/J 键判断注视点左侧/右侧更可能获得奖励。做出选择后，三角形和六边形反馈分别代表有奖或无奖（被试间平衡）。实验中收获得奖反馈的次数越多，

实验完成后的实际奖励越大。

12 个色块中每侧红色块的总数为 4 或 8，同时每侧右列红色块的个数为 0 或 2 或 4 或 6，即获得奖励的概率为 0 或 1/3 或 2/3 或 1。两侧刺激的概率配对及每种概率配对下的试次数量与图片选择任务相同，如表 1 所示。随着学习经验的获得，会意识到任务中隐藏的线索，即优势列的关键作用。图 2 的样例中，两列右侧为优势列，即按 F 键选择左列获得奖励的概率是 2/6（1/3），按 J 键选择右列获得奖励的概率是 4/6（2/3）。优势列在左或在右，在被试间平衡。另外，与图片选择任务不同的是，该任务包含 3 个 block（每个 block180 个试次），在 block2 有无奖励反馈之后会出现硬币具体位置的提示：在有奖反馈后，硬币会出现在所选侧右列的随机红色色块中；无奖反馈后，硬币会出现在所选侧右列的随机白色色块中。左右侧的设置在被试间平衡。实验流程图如图 2 所示。实验完成后要求被试报告做出选择的依据。

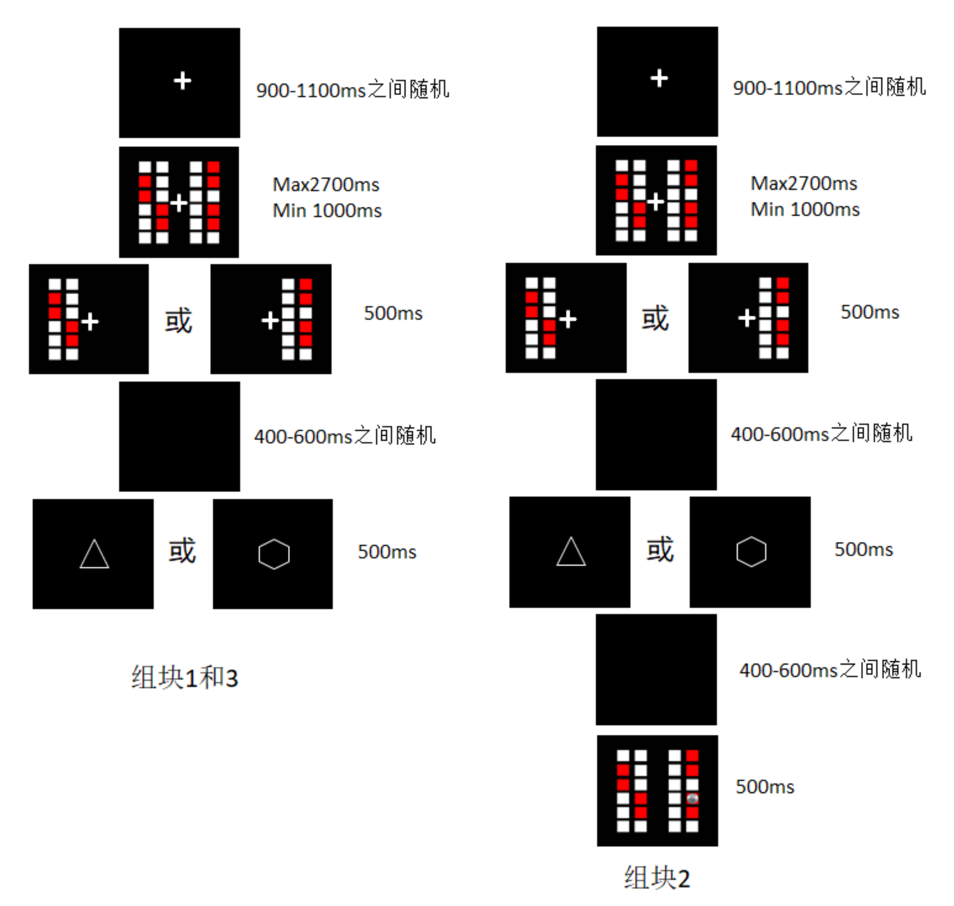


图 2 硬币搜索任务实验流程图

两个任务中蕴含了相同的概率匹配关系、时间间隔和奖励反馈模式，以期用于任务间学习情况的对比分析。同时两个任务在以下几个方面存在差异：首先，

刺激形式不同，这是为了避免被试内设计时任务规则间的互相干扰或易化。其次，任务流程不同，在无线索的图片选择任务中，无区组设计，而在有线索的硬币任务中，组块 2 中出现了硬币的具体位置，该设置是为了降低任务难度。在前人研究和本任务的预实验中，均发现若无硬币位置的提示，最终习得规则人数将大大降低。第三，存在无线索和有线索的设置差异。图片选择任务中无线索提示，硬币搜索任务的线索隐藏在色块个数的比较中，待被试通过学习而自主发现。

2.3 研究程序

对被试数字-字母转换任务的转换代价进行描述性统计分析（$M \pm SD$ = 813.41 ±389.24ms），前后 27%等分点分别为 525.27ms 和 1041.09ms。从转换代价前后 27%群体中邀约被试参加脑电实验。所有自愿被试需先完成瑞文推理测验，随后分两次完成图片选择任务和硬币搜索任务，实验顺序在被试间平衡，两次脑电实验间隔两周完成。

2.4 实验仪器

EEG 数据通过 Vision Recorder 2.0(Brain Product, Munich, Germany)和 64 导电极帽采集记录。左右参考电极分别置于双侧乳突，以双侧乳突平均值为参考。水平和垂直眼电分别记录于左眼外侧、左眼上 1cm 处。所有电极点头皮电阻均小于 5kΩ，采样率为 1000Hz。使用 EEGLAB 和 ERPLAB 对数据进行离线分析，离线滤波低通为 40Hz，峰值超过±100μV 的伪迹被删除。

2.5 数据采集与分析

对行为数据的分析上，为考察学习的动态过程，对每个被试的数据以窗长为 20，步长为 1 进行划窗分析。同时，参考以往研究的标准(Bellebaum & Daum, 2008)，如果被试在连续 20 次反应中，有 16 次及以上反应正确，并以不低于此水平保持在实验中，则认为该被试掌握了任务的反应规则，视为习得者。并以此转折点为该被试的习得点，进一步将实验阶段区分为习得前和习得后阶段。

对脑电数据的分析上，为探讨不同学习进程中的学习特征与机制，将两个任务的 ERP 分析都分为选择评价和反馈加工两个阶段。选择评价阶段锁时于注视点

及两侧刺激出现（如图 1 和 2 所示流程图中的第二屏），刺激出现前 200ms 为基线，分析时程为 1200ms。观察与分析发现两侧刺激诱发的 ERP 在额顶叶和枕区差异最大，同时参考以往研究(Dong et al., 2016)的数据分析，选取电极点 P3、P4、Pz、PO3、PO4、POz 对 P200 成分进行分析。由于具体任务形式差异，在图片任务中 220~280ms 时间窗内的平均值作为 P200 衡量值，硬币搜索任务的分析时间窗为 160~240ms。时间窗选择的考量是通过观察总平均波形图，使得时间窗的中心点落在 P200 峰值上。反馈加工阶段锁时于反馈刺激出现，反馈刺激出现前 200ms 为基线，ERP 分析时程为 700ms。电极点的选取参考以往关于反馈相关负波 FRN 的研究，以 200~300ms 时间窗内，Fz、FCz 和 Cz 三个电极点的平均值作为 FRN 的衡量值；同时将 300~400ms 时间窗内，CPz、Pz 和 POz 三个电极点的平均值作为 P300 的衡量值。

3 结果

3.1 数字-字母转换任务

对参加实验 297 名被试数字-字母转换任务的转换代价（X）进行描述统计分析，结果显示，X_{min}=137.54ms，X_{max}=2085.30ms，X_{mean}=813.41ms，X_{SD}=389.24ms。前后 27%等分点的值分别为 525.27ms 和 1041.09ms。基于此结果，参加脑电实验的高认知灵活性被试的转换代价均小于 525.27ms，低认知灵活性被试的转换代价均大于 1041.09ms。

3.2 瑞文推理测验

参加脑电实验的被试共 76 人，两人（高/低灵活性组各 1 人）由于将是否得奖与对应的按键混淆，数据未纳入后续分析，后续所有的结果分析均以 74 人的成绩进行。对高认知灵活性组 38 人，低认知灵活性组 36 人的智力测验得分进行独立样本 T 检验，结果显示，两组被试的成绩无显著差异[$t(72)$ =-0.88, p ＞ 0.05, *Cohen's d* = -0.21]。说明，高低认知灵活性组被试的智力水平相当，排除智力因素对结果的影响。

3.3 行为数据分析

3.3.1 图片选择任务的行为数据分析

(1)习得率和学习曲线

在图片选择任务中，高灵活性组 38 人，其中习得者 32 人，占比为 84.21%；低灵活性组 36 人中，习得者 17 人，占比 47.22%。高灵活性组的习得率水平显著高于低灵活性组[$\chi^2 = 11.31$, $df = 1$, $p = 0.001$]。

以高低灵活性水平和是否习得规则为双重依据，将所有被试分为四组，用学习曲线刻画四组被试的学习动态，结果如图 3 所示。

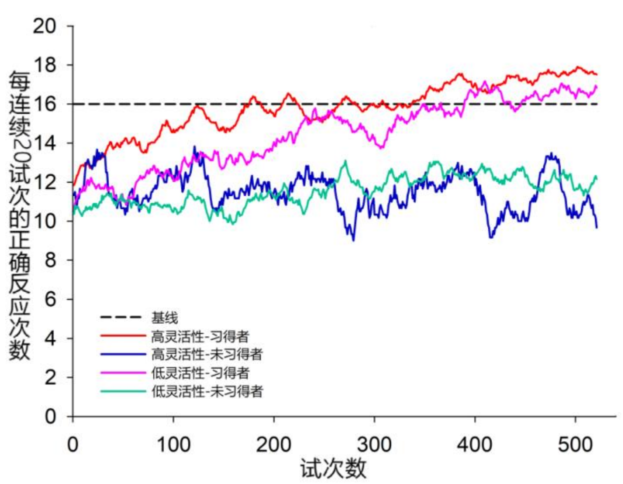


图 3 图片选择任务中各组被试的学习曲线图

(2)正确率

本研究的获奖反馈是基于概率属性的，以左侧 1/3-右侧 2/3 概率配对为例，被试选择其中一侧均可能获奖或不获奖。但如果选择右侧，收获奖励反馈的可能性更大，因此右侧是一个正确选项。

74 名被试（高灵活性组 38 人，低灵活性组 36 人）中，6 人（高灵活性组 5 人，低灵活性组 1 人）在实验开始后的 30 个试次左右就达到研究设定的习得标准，由于习得前阶段的有效试次数太少，这 6 名被试的分析中只有习得后阶段。这个实验过程中，正确率始终未达到习得标准的共 25 人（高灵活性组 6 人，低灵活性组 19 人）。重复测量数据分析中只分析了同时存在习得前和习得后的数据因此，共 43 人（高灵活性组 27 人，低灵活性组 16 人）的数据被纳入分析。

删除超时未反应的试次，对反应正确率进行 2（学习阶段：习得前、习得后）×4（概率配对：0-1/3、0-2/3、1/3-2/3、1/3-1）×2（灵活性水平：高、低）重

复测量方差分析。结果显示：学习阶段主效应显著[F(1,41) = 146.91, p< 0.001, η^2 =0.78]，习得后正确率显著大于习得前；概率配对主效应显著[F(3,123) = 14.87, p < 0.001, η^2 = 0.27]，0-1/3 配对条件的正确率显著小于其它三种条件（ps < 0.001）、0-2/3 条件的正确率显著大于 1/3-2/3 条件（p < 0.05）；灵活性水平主效应显著[F(1,41) = 6.08, p < 0.05, η^2 = 0.13]，高灵活性组正确率显著大于低灵活性组；学习阶段和概率配对交互作用显著，无论习得前还是习得后，四种概率配对间的正确率均差异显著（p < 0.001）。其它交互作用均不显著。

(3)反应时

对反应时 2×4×2 的重复测量方差分析结果显示：仅习得前后和概率配对的主效应显著。习得后的反应时显著小于习得前[F(1,41) =57.24, p < 0.001, η^2 = .58]，0-1/3 配对条件的反应时显著慢于其它三种条件（ps < 0.001），1/3-1 条件略快于 0-2/3 条件（p = 0.085）和 1/3-2/3 条件（p = 0.087）。

(4)获奖概率估计

实验结束后，被试对四个刺激分别进行了获奖概率估计，删除未用具体数字描述（语言描述或排序）的被试，对 63 人的结果进行分析。被试对 0，1/3，2/3 和 1 获奖概率下的估计值分别为 0.27、0.41、0.62 和 0.67。单因素方差分析显示概率主效应显著[F(3,251) = 38.18, p < 0.001]，LSD 事后多重比较发现，除 2/3 和 1 之间获奖估计值不显著外，其它两两之间差异均显著。

3.3.2 硬币搜索任务的行为数据分析

(1)习得率和学习曲线

在硬币搜索任务中，高灵活性组 38 人中，习得者 27 人，占比为 71.05%；低灵活性组 36 人中，习得者 12 人，占比 33.33%。高灵活性组的习得率水平显著高于低灵活性组[χ^2 = 10.55, df = 1, p =0.001]。

“高灵活性-习得”、“高灵活性-未习得”、“低灵活性-习得”、“低灵活性-未习得”四组被试的学习曲线如图 4 所示。两个习得组的习得转折点均在第二个 block，即第 181~360 试次之间，高灵活性组是第 244 试次，低灵活性组是第 257 试次。

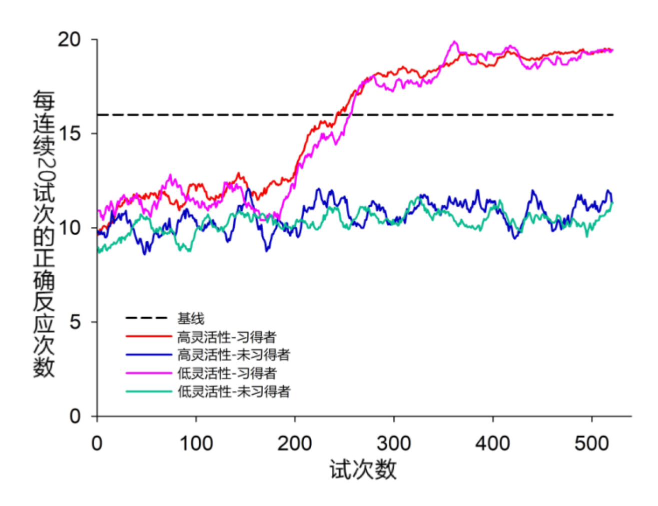


图 4 硬币搜索任务中各组被试的学习曲线图

(2)正确率

74 名被试（高灵活性组 38 人，低灵活性组 36 人）中，3 人（均为高灵活性组）在实验开始后通过较少的试次学习就达到研究设定的习得标准，由于习得前阶段的有效试次数太少，这 3 名被试的分析中只有习得后阶段。35 人（高灵活性 24 人，低灵活性 12 人）未习得规则，无习得后阶段。因此，在包含习得前-习得后的重复测量分析中，36 人（高灵活性组 24 人，低灵活性组 12 人）同时存在习得前和习得后阶段。

删除超时未反应的数据，对正确率进行 2（学习阶段）×4（概率配对）×2（灵活性水平）重复测量方差分析。结果显示：学习阶段主效应显著[$F(1,34) = 709.73$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.95$]，习得后正确率显著高于习得前阶段；概率配对主效应显著[$F(3,102) = 10.94$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.24$]，除了 0-2/3 和 1/3-1 这两种概率配对间差异不显著外，其他每两种配对间正确率差异均显著；学习阶段和灵活性水平交互作用边缘显著[$F(1,34) = 3.05$, $p = 0.090$, $\eta^2 = 0.08$]，简单效应分析表明，高低灵活性组仅在习得后阶段正确率存在显著差异[$F(1,34) = 12.65$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.27$]，其他主效应和交互效应均不显著。

(3)反应时

与正确率的分析类似，对反应时进行 2（学习阶段）×4（概率配对）×2（灵活性水平）重复测量方差分析。结果显示：仅学习阶段和灵活性的交互作用不显著，其他主效应和交互效应均显著。学习阶段主效应显著[$F(1,34) = 84.56$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.71$]，习得后的反应时显著快于习得前；概率配对主效应显著[$F(3,102) = 10.03$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.23$]，除了 0-2/3 和 1/3-2/3 这两种概率配对间差异不显著外，其他每两种配对间正确率差异均显著；灵活性主效应边缘显著[$F(1,34) = 3.40$,

p = 0.074, η^2= 0.09]，高灵活性组的反应时快于低灵活性组；学习阶段和概率配对交互作用显著[F(3,102) = 7.73, p< 0.001, η^2 = 0.19]，简单效应分析显示，仅习得后阶段四种概率配对间的反应时差异显著；概率配对和灵活性交互作用显著[F(3,102) = 3.20, p < 0.05, η^2 = 0.09]，简单效应分析显示，仅低灵活性组在四种概率配对条件下反应时差异显著；三个因素交互作用边缘显著[F(3,102) = 2.18, p = 0.100, η^2 = 0.06]。

3.4 脑电数据分析

3.4.1 图片选择任务的脑电数据分析

43 个同时存在习得前后的被试中，有 7 人（高灵活性 4 人，低灵活性 3 人）因脑电信号伪迹过多，未参与脑电数据分析，因此，36 人（高灵活性组 23 人，低灵活性组 13 人）同时存在习得前和习得后阶段，进入脑电数据分析。

(1)选择评价阶段

对 220~280ms 时间窗内的 Pz、P3、P4、POz、PO3 和 PO4 点的 P200 成分分别进行 2（学习阶段）×4（概率配对）×2（灵活性水平）混合重复测量方差分析，Pz 点的结果显示，学习阶段和概率配对的交互作用边缘显著[F(3,102) = 2.66, p = 0.052, η^2= 0.07]，仅 1/3-1 条件下，习得前后 P200 波幅边缘显著（p = 0.068）。P3 点的结果显示，概率配对和灵活性交互作用边缘显著[F(3,102) = 2.221, p = 0.090, η^2= 0.06]，简单效应分析显示，仅在 0-1/3 条件下，高低灵活性组间差异边缘显著(p = 0.088)。P4 点的结果显示，仅学习阶段和概率配对交互作用边缘显著[F(3,102) = 2.608, p = 0.056, η^2= 0.07]，简单效应分析显示，仅在 1/3-1 配对条件下，习得前后差异显著(p < 0.05)。POz 点的结果显示，学习阶段和概率配对交互作用边缘显著[F(3,102) = 2.79, p < 0.05, η^2= 0.08]，简单效应分析显示，1/3-1 配对条件下，习得前后差异显著(p < 0.05)。PO3 点的结果显示，学习阶段主效应显著[F(1,34) = 6.12, p < 0.05, η^2= 0.15]。PO4 点的结果显示，学习阶段主效应显著[F(1,34) = 4.99, p < 0.05, η^2= 0.13]；概率配对和灵活性交互作用边缘显著[F(3,102) = 2.19, p = 0.094, η^2= 0.06]，简单效应分析显示，仅在 0-1/3 配对条件下，高低灵活性组间差异边缘显著(p = 0.071)。

(2)反馈加工阶段

在对 FRN 波幅的分析中，采用了两种分析方法：第一种是 2（学习阶段）×

2（刺激概率）×2（获奖反馈）×2（灵活性水平）重复测量方差分析；同时，为探讨概率类别学习任务中的预期效应，考察被试基于反馈学习是否能在生理水平形成对潜在规则的预期，进一步分析了预期内和预期外的波幅特点。本研究的0、1/3、2/3 和 1 四种概率中，0 和 1/3 是低概率条件，2/3 和 1 是高概率条件。在高概率条件下获得奖励反馈、在低概率条件下没有奖励反馈均意料之内的情形；类似的，高概率条件下没有奖励反馈、低概率条件下有奖励反馈是意料之外的情形。预期内波幅=低概率无奖波幅-高概率有奖波幅，预期外波幅=高概率无奖波幅-低概率有奖波幅。

首先，以反馈刺激呈现后 200~300ms，额中央区 Fz、FCz 和 Cz 三个电极点的均值作为 FRN 的衡量值，2（学习阶段：前/后）×2（刺激概率：高/低）×2（获奖反馈：有/无）×2（灵活性水平）重复测量方差分析结果显示：概率主效应边缘显著[$F(1,34) = 3.33$, $p = 0.077$, $\eta^2 = 0.09$]，低概率波幅略大于高概率；奖励主效应显著[$F(1,34) = 74.05$, $p = 0.000$, $\eta^2 = 0.69$]，获奖反馈波幅大于无奖反馈；学习阶段、获奖反馈和灵活性三者交互作用边缘显著[$F(1,34) = 3.40$, $p = 0.074$, $\eta^2 = 0.09$]，简单效应分析表明：各条件下的奖励波幅均显著大于无奖反馈($p = .000$)；学习阶段、获奖反馈和概率三者交互作用边缘显著[$F(1,34) = 3.47$, $p = 0.071$, $\eta^2 = 0.09$]。简单效应分析表明：各条件下的奖励波幅均显著大于无奖反馈($p = 0.000$)。各实验条件下的平均波形和波幅如图 5 所示。

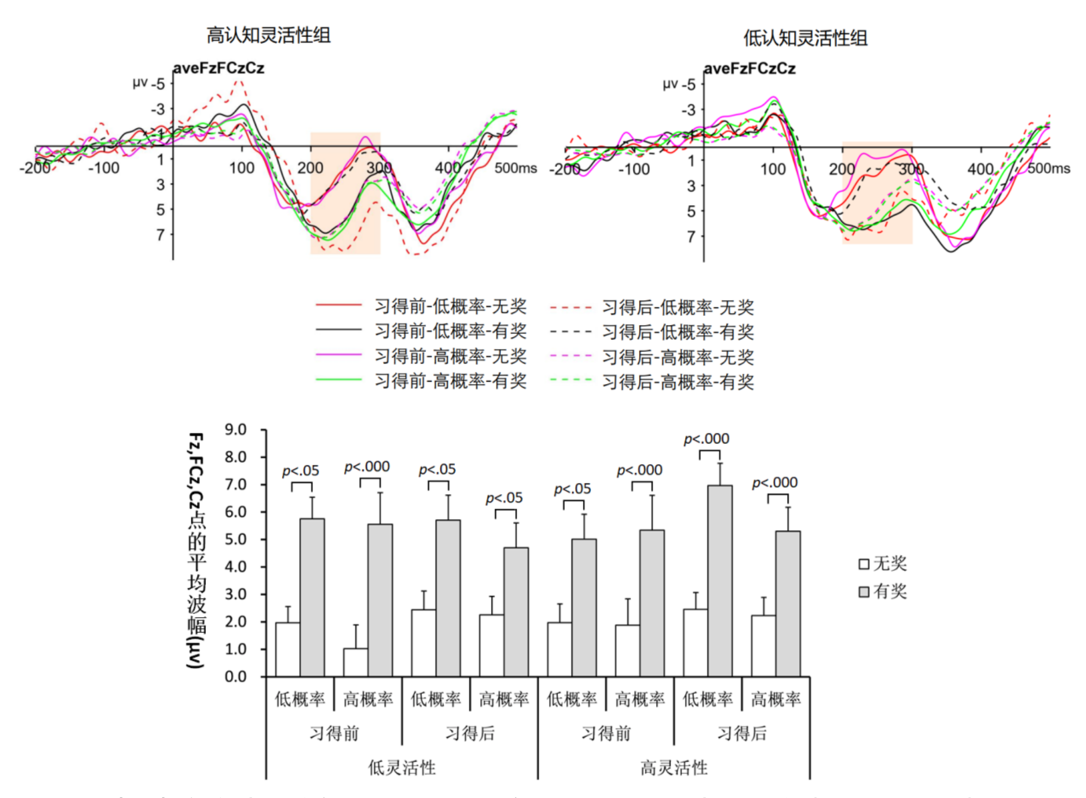


图 5 图片选择任务中，高低认知灵活性组在 Fz、FCz、Cz 点的平均波形图(上)和波幅图(下)

进一步地，反馈刺激呈现后 200~300ms，额中央区 Fz、FCz 和 Cz 三个电极点的均值作为 FRN 的衡量值，2（学习阶段）×2（预期：内/外）×2（灵活性水平）重复测量方差分析结果显示，预期主效应边缘显著[$F(1,34) = 3.33$, $p = 0.077$, $\eta^2 = 0.09$]，预期外 FRN 波幅大于预期内条件（如下图 6 所示）；学习阶段和灵活性交互作用边缘显著[$F(1,34) = 3.40$, $p = 0.074$, $\eta^2 = 0.09$]，但两组被试在习得前和习得后阶段波幅差异均不显著。

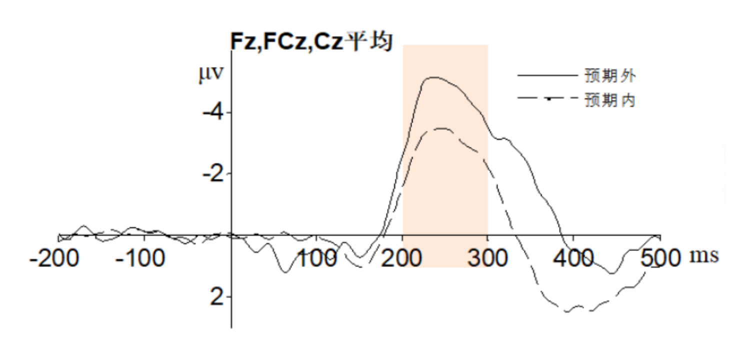


图 6 图片选择任务的反馈加工阶段 FRN 波形图

同时，反馈刺激呈现后 300~400ms，顶枕区 CPz、Pz 和 POz 三个电极点的均值 P300 波幅 2（学习阶段）×2（刺激概率）×2（获奖反馈：有/无）×2（灵活性水平）重复测量方差分析结果显示，学习阶段主效应边缘显著[$F(1,34) = 3.30$, $p = 0.078$, $\eta^2 = 0.09$]，习得前波幅略高于习得后；刺激概率主效应显著[$F(1,34) = 19.16$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.36$]，低概率刺激波幅显著大于高概率；获奖反馈主效应显著[$F(1,34) = 52.80$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.61$]，有奖反馈波幅显著大于无奖反馈；学习阶段和刺激概率交互作用显著[$F(1,34) = 10.83$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.24$]，简单效应分析表明，仅在高概率条件下，习得前后 P300 波幅差异显著；刺激概率、获奖反馈和灵活性三者交互作用显著[$F(1,34) = 5.30$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.14$]，但简单效应分析表明，高低灵活性组在各条件下的波幅差异均不显著；四个因素交互作用边缘显著[$F(1,34) = 3.18$, $p = 0.083$, $\eta^2 = 0.09$]，简单效应分析表明，高低两组灵活性被试在“习得前-高概率-有奖反馈”条件下 P300 波幅差异边缘显著[$F(1,34) = 3.04$, $p = 0.091$, $\eta^2 = 0.08$]，各实验条件下的平均波形和波幅如图 7 所示。

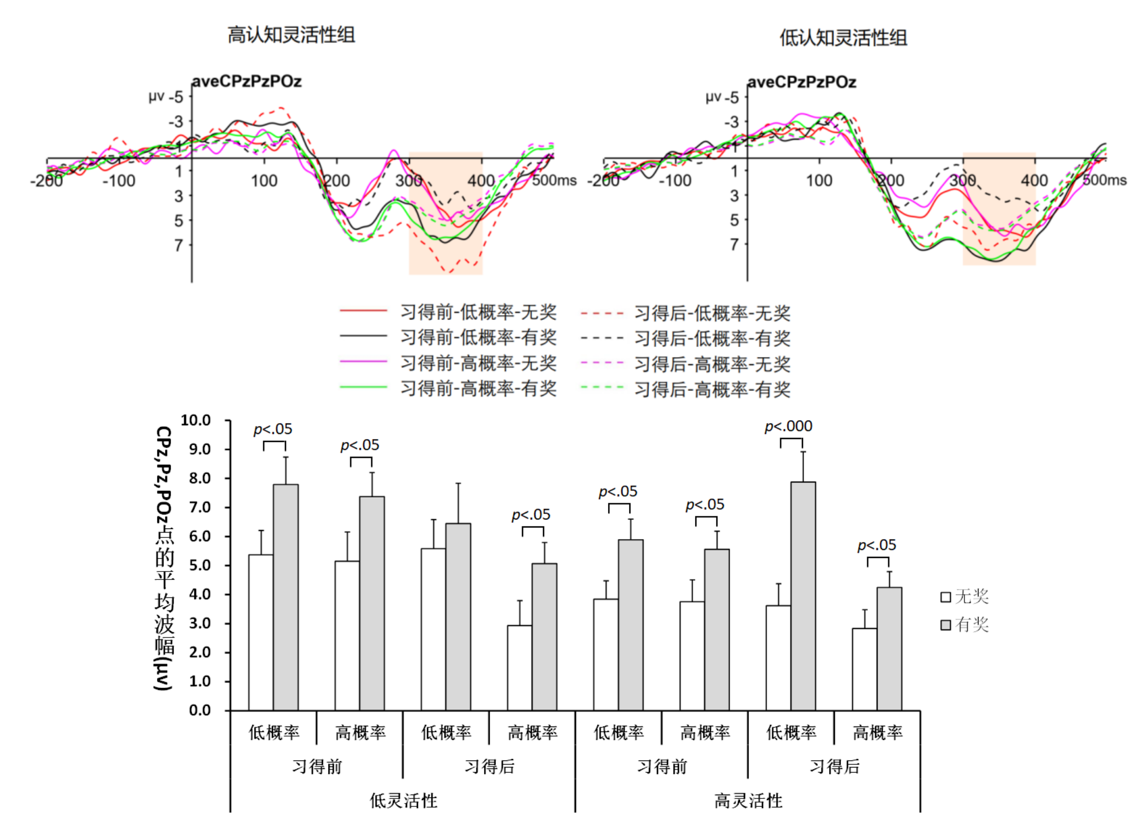


图 7 图片选择任务中，高低认知灵活性组在 CPz、Pz、POz 点的平均波形图(上)和波幅图(下)

3.4.2 硬币搜索任务的行脑电数据分析

36 个同时存在习得前后的被试中，有 3 人（均为高灵活性）因脑电信号伪迹过多，未参与脑电数据分析，因此，33 人（高灵活性组 21 人，低灵活性组 12 人）同时存在习得前和习得后阶段，进入脑电数据分析。

(1)选择评价阶段

对 160~240ms 时间窗内的 Pz、P3、P4、POz、PO3 和 PO4 点的 P200 成分分别进行 2（学习阶段）×4（概率配对）×2（灵活性水平）混合重复测量方差分析，均显示学习阶段主效应显著，Pz 点的结果显示，习得后选择评价的 P200 波幅显著小于习得前[$F(1,31) = 6.65$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.18$]。两侧概率差为 2/3 的两个条件（0-2/3，1/3-1）下，习得后波幅均显著小于习得前（$p < 0.05$）。P3 点的结果显示，学习阶段主效应显著[$F(1,31) = 9.90$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.24$]，学习阶段和概率配对交互作用边缘显著[$F(3,93) = 2.34$, $p = 0.08$, $\eta^2 = 0.07$]，简单效应分析显示，0-2/3 和 1/3-1 配对条件下，习得前波幅显著大于习得后($p < 0.05$)。P4 点的结果显示，学习阶段主效应显著[$F(1,31) = 12.23$, $p < 0.06$, $\eta^2 = 0.28$]。POz 点的结果显

示，学习阶段主效应显著[$F(1,31) = 11.24, p < 0.056, \eta^2 = 0.27$]，除 1/3-2/3 配对条件下，习得前后波幅差异边缘显著($p = 0.077$)，其它三个概率配对条件下差异均显著($ps < 0.05$)。PO3 点的结果显示，学习阶段主效应显著[$F(1,31) = 15.93, p < 0.001, \eta^2 = 0.34$]。PO4 点的结果显示，学习阶段主效应显著[$F(1,31) = 16.37, p < 0.001, \eta^2 = 0.35$]。

(2)反馈加工阶段

与图片选择任务相同，对反馈加工的 FRN 波幅进行了效价和预期特点的分析。

反馈刺激呈现后 200~300ms，额中央区 Fz、FCz 和 Cz 三个电极点的均值作为 FRN 的衡量值，2（学习阶段：前/后）×2（刺激概率：高/低）×2（获奖反馈：有/无）×2（灵活性水平）重复测量方差分析结果显示，概率主效应显著[$F(1,31) = 5.31, p < 0.05, \eta^2 = 0.15$]，低概率波幅显著大于高概率；获奖反馈主效应显著[$F(1,31) = 44.26, p < 0.001, \eta^2 = 0.59$]，有奖反馈波幅显著大于无奖反馈；获奖反馈和灵活性交互作用边缘显著[$F(1,31) = 3.38, p = 0.08, \eta^2 = 0.10$]，简单效应分析结果说明，无论高灵活性还是低灵活性者，获奖反馈波幅都显著大于无奖反馈($p < 0.05$)；学习阶段和刺激概率交互作用显著[$F(1,31) = 5.38, p < 0.05, \eta^2 = 0.15$]，简单效应结果显示，规则习得后，低概率波幅大于高概率条件($p < 0.05$)；高概率条件下，习得前波幅大于习得后($p < 0.05$)；学习阶段、刺激概率和灵活性三者交互作用显著[$F(1,31) = 6.02, p < 0.05, \eta^2 = 0.16$]；习得后，高灵活性者的低概率波幅显著大于高概率($p = 0.001$)，高灵活性者仅在高概率条件下，习得前波幅大于习得后($p = 0.01$)，各实验条件下的平均波形和波幅如图 8 所示。

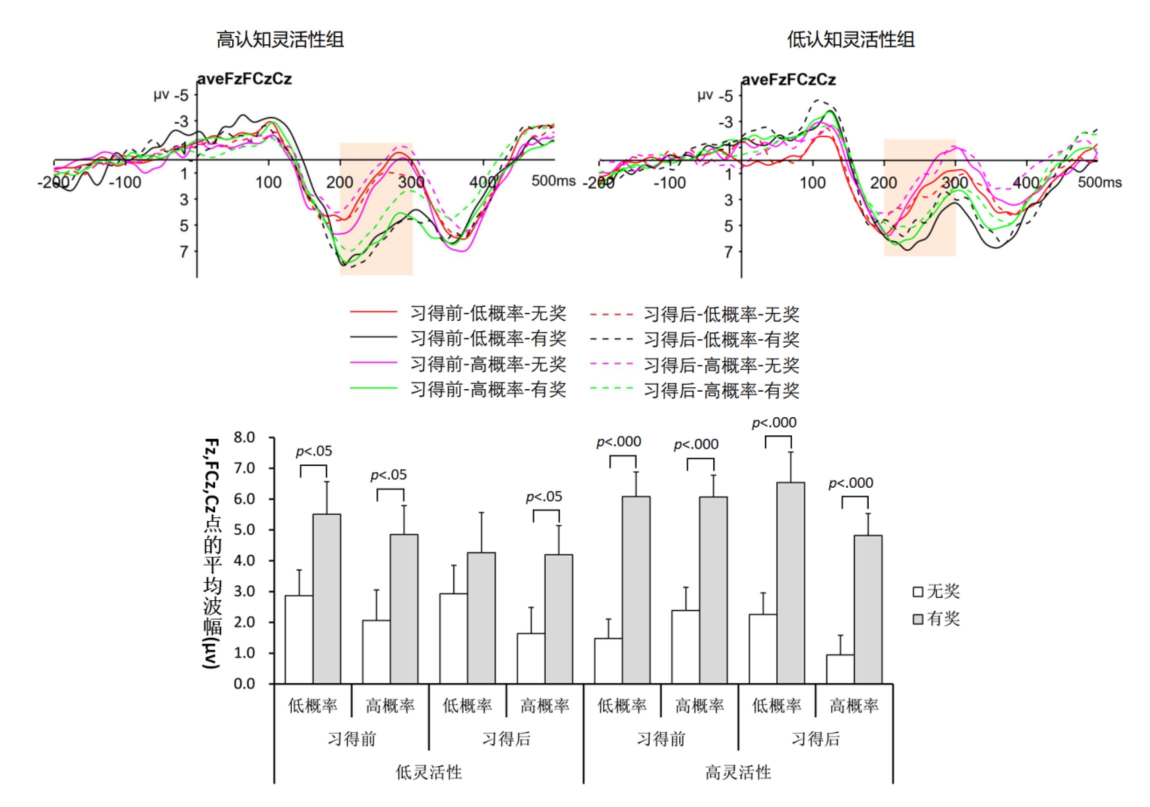


图 8 硬币搜索任务中，高低认知灵活性组在 Fz、FCz、Cz 点的平均波形图(上)和波幅图(下)

反馈刺激出现后 200~300ms、额中央区 Fz、FCz 和 Cz 三个电极点均值的 2（学习阶段）×2（预期：内/外）×2（灵活性水平）重复测量方差分析结果显示：预期主效应显著、灵活性主效应边缘显著、学习阶段和预期交互作用显著，简单效应分析发现，预期内外的波幅差异仅在习得后阶段显著；学习阶段-预期-灵活性水平三者的交互作用显著，简单效应分析结果说明，高灵活性组在“习得前-预期内”（$p < 0.05$）和“习得后-预期外”（$p = 0.073$）的波幅显著大于低灵活性组（波幅值更负），如下图 9 所示。

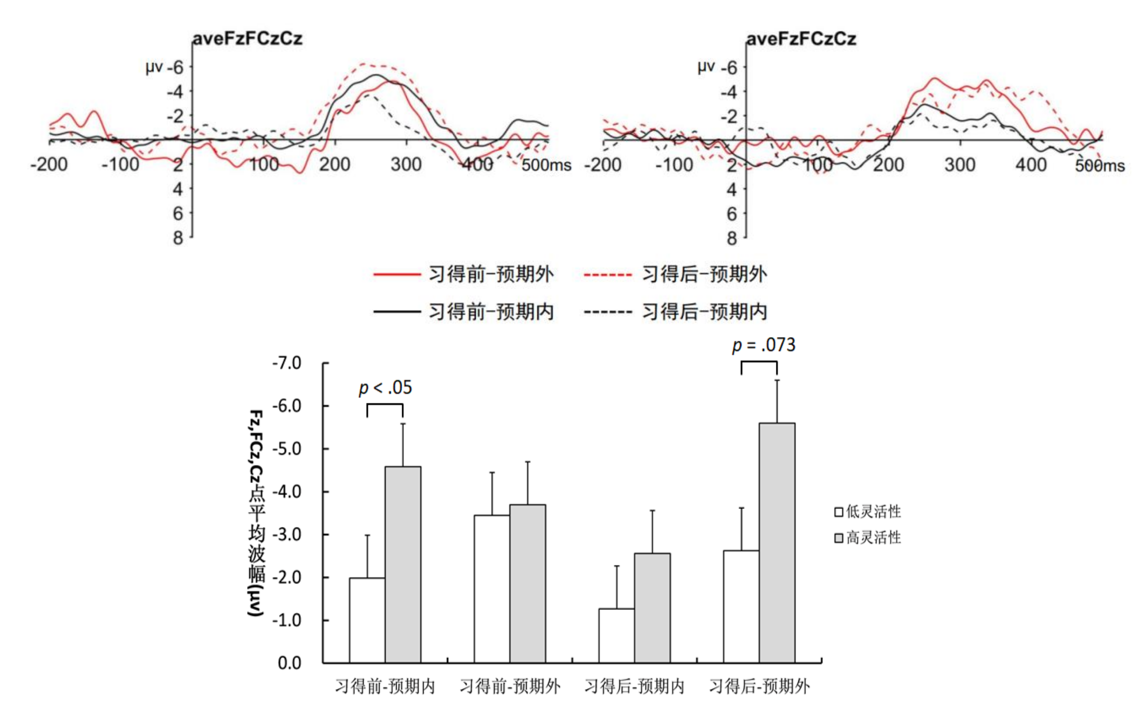


图 9 高低灵活性组在学习阶段和预期各交互条件下的 FRN 波形图(上)和波幅图(下)

反馈刺激呈现后 300~400ms，顶枕区 CPz、Pz 和 POz 三个电极点的平均值作为反馈加工 P300 的衡量值，ERP 总平均波形图和地形图如下图 10 所示。2（学习阶段）×2（刺激概率：高/低）×2（获奖反馈：有/无）×2（灵活性水平）重复测量方差分析结果显示：概率主效应显著[F(1,31) = 17.28, p < 0.001, η^2 = 0.36]，低概率的 P300 波幅显著大于高概率条件；获奖反馈主效应显著[F(1,31) = 71.16, p < 0.001, η^2 = 0.70]，有奖反馈波幅显著大于无奖反馈；概率和灵活性水平交互作用显著[F(1,31) = 8.20, p < 0.05, η^2 = 0.21]，简单效应分析表明，仅低灵活性组的高低概率条件间的 P300 波幅存在差异；学习阶段和概率交互作用显著[F(1,31) = 4.18, p < 0.05, η^2 = 0.12]，仅在高概率条件下，习得前后的波幅差异显著。其它主效应和交互效应均不显著。各实验条件下的平均波形和波幅如图 10 所示。

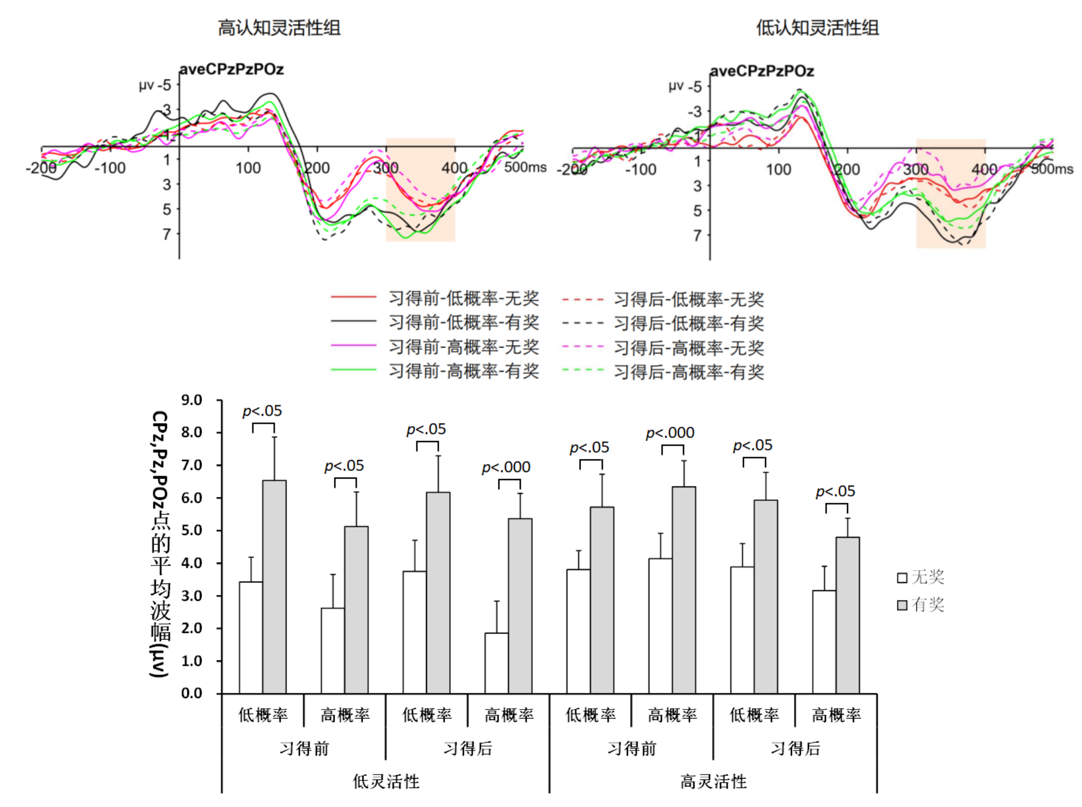


图 10 硬币搜索任务中，高低认知灵活性组在 CPz、Pz、POz 点的平均波形图(上)和波幅图(下)

4 讨论

4.1 概率类别任务的学习特点

本研究的两个实验任务均涉及规则形成和概率估计的双重加工过程。被试需要基于每个试次的“刺激-反应-反馈”链，寻找出适用于整个任务的最可能反应标准，并以此为依据做出正确反应。同时，相较于一般的概率估计任务，本研究的两个任务均未事先透露任何有关概率的信息，被试需要克服寻找确定性结果的反应偏向，最终接受一定程度不可避免的无奖反馈(Craig et al., 2011)。从任务结束后与被试的沟通中发现，尽管有的被试已对优势选项有了判断，但仍然会尝试其它的反应标准，想找到一个能稳定获得有奖反馈的依据，验证了确定性认知偏向的存在。

从学习曲线、反应正确率和反应时分析结果可以看出，尽管在两个任务的学习后阶段，被试对刺激的获奖可能性都有了优劣区分，但无线索的图片选择任务的学习效果弱于硬币搜索任务，具体体现为：第一，学习曲线上，习得后阶段，图片选择任务的正确率只徘徊在基线附近，这反映学习者对该任务规则的不确定

程度高于硬币搜索任务。第二，正确率数据说明，图片任务中，学习者在 0-1/3 配对条件的习得后正确率仅为 0.67，并未形成明显的反应倾向。这可能是由于两侧都极少会获得积极反馈，被试无法仅基于一侧 1/3 的获奖可能性构建选择依据。

那为什么无线索的图片选择和有隐藏线索的硬币搜索任务的概率配对条件完全相同，学习效果却不尽一致呢？可能的原因是任务的规则表征层次及依赖的加工系统存在差异。概率类别学习基于外显的言语系统，还是内隐的程序加工系统，以及两个系统之间的关系，一直存在争议(Lagnado et al., 2006; Li et al., 2016; 徐贵平 等, 2011)。本研究的图片选择任务完成后，极少有被试能清晰报告出他们完成任务的依据，附加进行的图片刺激选择排序是为了帮助研究者识别被试的选择倾向，该任务的学习表现出内隐加工的特点。而硬币搜索任务中，大部分被试能对所依赖的反应依据进行描述，规则表征上升到外显系统。这得益于任务中反应线索的存在：两侧红色方块数量差异的线索有助于将概率问题转换为频数问题，降低难度。这也促使学习后期，硬币搜索任务的规则明显度增加，前人研究证明，在任务明显度和信息量大的情况下，会表现出外显学习的特征(刘志雅, 郑琛, 2015)。而图片选择任务中的线索就是刺激材料本身，无法通过对某个特征的关联获得正确反应“捷径”。联结学习理论指出，概率学习中存在两种独立的学习过程，一种依赖长时记忆系统，通过内隐的、累积的方式形成概率表征；另一种依赖短时记忆系统，通过对最近事件的加工形成概率经验(Otto et al., 2011)。图片任务中，被试只能根据先前累积的模糊概率表征和近期试次的概率经验来反应。值得一提的是，内隐和外显系统可能同时参与到概率学习的过程(李开云 等, 2012)，就本研究的结果来看，主要依赖内隐加工的无线索任务图片任务和可在线索推动下到达外显层次的硬币任务中，均可能到达习得的水平，但有线索的概率类别学习会大大增加学习者做出反应的信心，表现出更稳定的习得水平。此外，前人关于高低概率线索作用的研究发现，线索的作用在高概率条件下能有效发挥，以促进选择性注意策略的生成(Girardi et al., 2013)。学习者最初基于试次间关系的内隐信息做出选择判断，当某个高概率的特殊关系或结构被知觉为优势信息时，认知系统才会基于该线索组织后续的学习过程。在本研究的硬币任务中，两侧优势列刺激的概率差异大即为优势信息。结果也证实了该优势信息对学习的促进（两侧概率差为 2/3 的两个条件（0-2/3，1/3-1）下，习得后波幅均显著小于习得前）。Girardi 等(2013)进一步认为锁时于高频率线索的机制是任务中内源性注意成分转换的开关。

4.2 认知灵活性在不同学习阶段的特点

本研究从选择评价和反馈加工两个阶段着手，在不包含线索的图片选择任务和包含线索的硬币搜索任务中探讨认知灵活性的作用，发现认知灵活性对学习的影响与任务特点存在很大关系。

在选择评价阶段，硬币任务中未发现认知灵活性发挥作用的证据，图片任务中发现仅在 0-1/3 概率配对下高低灵活性组间存在微弱的差异(P3 和 PO4 点差异边缘显著)。该结果与 Dong 等(2016)在爱荷华赌博任务中发现的高低认知灵活性者的差异性表现不符，也未能支撑本研究提出的假设。研究者指出，该阶段分析的 P200 成分与刺激的知觉、注意加工和短时记忆有关(Dong et al., 2016; 邢强 等, 2017)。尽管两个任务选择评价阶段的 ERP 组间差异结果相似，但推测原因并不相同。在无线索的图片任务中，两组差异不明显是因为即使是高灵活性学习者，也未能对所有的配对刺激形成相对稳定的差异化表征；而在有线索的硬币任务中，多个电极点上显示出 P200 的习得阶段主效应，说明刺激已被差异化表征。两被试组无差异的可能原因是，在线索和组块 2 的驱动下，削弱了高低灵活性组之间的差异。

在反馈加工阶段，图片选择任务中，高认知灵活性组的正确率高于低灵活性组；在反馈加工指标 P300 成分上，高认知灵活性组在“习得前-高概率-有奖反馈”条件下的波幅略大于低灵活性组。反馈 P300 成分更多地反映对结果评价自上而下的控制过程，能吸引更多注意分配的因素，包括奖励效价、大小等都可能作用于 P300(Wu & Zhou, 2009)。获得奖励反馈的高概率刺激能快速吸引高认知灵活性学习者的注意力，他们消耗较少的认知资源就能完成对这类刺激的加工。硬币搜索任务中，高灵活性组的反应时略小于低灵活性组；在习得后阶段，高灵活性组的正确率高于低灵活性组；在反馈加工指标 FRN 成分上，高灵活性组的波幅略大于低灵活性组，且高灵活性组在“习得前-预期内”和“习得后-预期外”两个条件下的 FRN 波幅大于低灵活性组。FRN 反映的是基于线索评价后，对随后可能结果的预期(Bellebaum & Daum, 2008; 李丹阳 等, 2018)。在本研究概率类别学习任务中，FRN 形成的前提条件是，学习者基于“刺激-反应-反馈”的学习，对特定线索后的反应结果形成预期。数据表明，在硬币搜索任务的行为反应达到设定的基准线之前，高灵活性者已对预期内结果有了更强的预期；同时在习得后阶段，“高概率-无奖”和“低概率-有奖”的结果会让他们觉得更意外。然而，

即使是高灵活性组，也未能在图片选择任务的所有条件下对反应选择的结果形成稳定预期，故图片选择任务中未能在反馈 FRN 成分上表现出差异。这与两个任务的行为曲线差异表现相一致。

本研究的结果说明，在概率类别任务中，高认知灵活性组的规则习得率高于低灵活性组，ERPs 结果进一步说明这种学习优势与反馈加工密不可分。对反馈信息，无论是外部显性反馈还是内部隐性反馈信息的有效加工能帮助学习者梳理当前状态到目标状态之间的差距，并在此基础上生成备选方案。灵活性的形成依赖选择及使用恰当的信息，理解当下的情境(Spiro, 1988)，能将反馈信息与当前问题情境进行有效整合的学习者更容易洞悉规则，获得解决方案。研究证实，这种反思性思维倾向对认知灵活性有显著的正向预测作用(Orakci, 2021)。本研究针对大学生被试群体的结果说明：在完全无干预条件下，就群体层面而言，给予相同反馈信息时，低灵活性学习者无法达到高灵活性者同等的学习效果（相似的规则习得率、相似的冲突觉察水平）。

此外，由于本研究从降低任务难度角度考虑，在硬币搜索任务中增加了组块 2 的设计，但这也可能会直接导致高低灵活性组间差异的缩小，如学习曲线上显示高低灵活性组的习得拐点非常接近，高低灵活性组仅在选择评价的个别条件(如 0-1/3 概率配对)、反馈加工的“习得前-预期内”“习得后-预期外”水平上存在差异性证据。

4.3 不足与展望

研究使用了是否包含线索的两个概率类别任务，探讨认知灵活性在概率类别学习中的作用。两个任务在特征上的进一步匹配能有助于进行更充分的对比分析。在匹配任务的基础上，未来研究还可以进一步设置层次更丰富的线索特征来探讨认知灵活性的作用。

5 结论

第一，概率类别任务中，高认知灵活性组的规则习得水平优于低认知灵活性组，认知灵活性具备跨任务优势。

第二，高认知灵活性者在概率类别学习中的优势源于反馈加工过程。

参考文献

Alfonso, S. V., & Lonigan, C. J. (2021). Trait anxiety and adolescent's academic achievement: the role of executive function. *Learning and Individual Differences, 85*, 101941.

Allan, N. P., Hume, L. E., Allan, D. M., Farrington, A. L., & Lonigan, C. J. (2014). Relations between inhibitory control and the development of academic skills in preschool and kindergarten: a meta-analysis. *Developmental Psychology, 50*(10), 2368–2379.

Bai, X., & Yao, H. (2018). Differences in cognitive inhibition between persons with high and low creativity: evidences from behavioral and physiological studies. *Acta Psychologica Sinica,* 50(11), 1197–1211.

[白学军, 姚海娟. (2018). 高低创造性思维水平者的认知抑制能力：行为和生理的证据. 心理学报, 50(11), 1197–1211.]

Bellebaum, C., & Daum, I. (2008). Learning-related changes in reward expectancy are reflected in the feedback-related negativity. *European Journal of Neuroscience, 27*, 1823–1835.

Bos, W. v. d., Crone, E. A., & Güroğlu, B. (2012). Brain function during probabilistic learning in relation to IQ and level of education. *Developmental Cognitive Neuroscience, 2S*, S78–S89.

Craig, S., Lewandowsky, S., & Little, D. R. (2011). Error Discounting in probabilistic category learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 37*(3), 673–687.

Deák, G. O., & Wiseheart, M. (2015). Cognitive flexibility in young children: general or task-specific capacity? *Journal of Experimental Child Psychology, 138*, 31–53.

Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology, 64*, 135–168.

Dong, X., Du, X., & Qi, B. (2016). Conceptual knowledge influences decision making differently in individuals with high or low cognitive flexibility: an ERP study. *PLoS ONE, 11*(8), e0158875. doi: 10.1371/journal.pone.0158875

Erb, C. D., Moher, J., Song, J.-H., & Sobel, D. M. (2017). Cognitive control in action: tracking the dynamics of rule switching in 5-to 8-year-olds and adults. *Cognition, 164*, 163–173.

Feng, X., & Feng, C. (2019). The index predicting power and feedback processing characteristics in the WCST. *Psychology and Behavioral Sciences, 8*(3), 72–78. doi: 10.11648/j.pbs.20190803.13

Girardi, G., Antonucci, G., & Nico, D. (2013). Cueing spatial attention through timing and probability. *Cortex, 49*, 211–221.

He, L., Li, Y., Zhuang, K., Chen, Q., Sun, J., Yang, W., & Wei, D. (2020). Network connectivity of the creative brain: current knowledge and future directions. *Chinese Science Bulletin*, 65, 25–36.

[何李, 李彧, 庄恺祥, 陈群林, 孙江洲, 杨文静, 位东涛, 邱江. (2020). 创造性的大脑网络连接特征与研究展望. 科学通报, 65(1), 25–36.]

Koch, I., & Allport, A. (2006). Cue-based preparation and stimulus-based priming of tasks in task switching. *Memory and Cognition, 34*(2), 433–444.

Lagnado, D. A., Newell, B. R., Kahan, S., & Shanks, D. R. (2006). Insight and strategy in multiple-cue learning. *Journal of Experimental Psychology: General, 135*(2), 162–183.

Lange, F., Kip, A., Klein, T., Müller, D., Seer, C., & Kopp, B. (2018). Effects of rule uncertainty on cognitive flexibility in a card-sorting paradigm. *Acta Psychologica, 190*, 53–64.

Lange, F., Seer, C., & Kopp, B. (2017). Cognitive flexibility in neurological disorders: cognitive components and event-related potentials. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 83*, 496-507. doi: 10.1016/j.neubiorev.2017.09.011

Lange, F., Seer, C., Müller, D., & Kopp, B. (2015). Cognitive caching promotes flexibility in task switching:

evidence from event-related potentials. *Scientific Reports, 5*, 17502.
Li, D., Li, P., & Li, H. (2018). The updated theories of feedback-related negativity in the last decade. *Advances in Psychological Science*, 26(9), 1642–1650.
[李丹阳, 李鹏, 李红. (2018). 反馈负波及其近十年的理论解释. 心理科学进展, 26(9), 1642–1650.]
Li, K., Fu, Q., & Fu, X. (2012). Cognitive and neural mechanisms of probabilistic category learning. Progress in Biochemistry and Biophysics, 39(11), 1037–1044.
[李开云, 付秋芳, 傅小兰. (2012). 概率类别学习的认知神经机制. 生物化学与生物物理进展, 39(11), 1037–1044.]
Li, K., Fu, Q., Sun, X., Zhou, X., & Zhou, X. (2016). Paired-associate and feedback-based weather prediction tasks support multiple category learning systems. *Frontiers in Psychology, 7*, 1–10.
Liu, Z., & Zheng, C. (2015). Information amount and obviousness influence hypothesis generation. *Acta Psychologica Sinica*, 47(12), 1445–1453.
[刘志雅, 郑琛. (2015). 信息量和明显度对规则可获得性的影响. 心理学报, 47(12), 1445–1453.]
Miao, X., Li, Y., Wang, M., & Zhang, Z. (2015). The information processing flexibility of obsessive-compulsive tendency individuals. *Journal of Psychological Science, 38*(5), 1264–1271.
[苗小翠, 李益娟, 汪孟允, 张仲明. (2015). 强迫强项个体的信息加工灵活性. *心理科学, 38*(5), 1264–1271.]
Newell, B. R., Lagnado, D. A., & Shanks, D. R. (2007). Challenging the role of implicit processes in probabilistic category learning. *Psychonomic Bulletin & Review, 14*(3), 505–511.
Orakci, Ş. (2021). Exploring the relationships between cognitive flexibility, learner autonomy, and reflective thinking tendency. *Thinking Skills And Creativity, In Press*. doi: 10.1016/j.tsc.2021.100838
Otto, A. R., Taylor, E. G., & Markman, A. B. (2011). There are at least two kinds of probability matching: evidence from a secondary task. *Cognition, 118*, 274–279.
Rogers, R., & Monsell, S. (1995). The costs of a predictable switch between simple cognitive tasks. *Journal of Experimental Psychology: General, 124*, 207–231.
Schenk, S., Lech, R. K., & Suchan, B. (2017). Games people play: how video games improve probabilistic learning. *Behavioural Brain Research, 335*, 208–214.
Spiro, R. J. (1988). *Cognıtıve flexibility theory: advanced knowledge acquısıtion in ill-structured domains*. Paper presented at the The Tenth Annual Conference of the Cognitive Science Society, Montreal.
Stad, F. E., Wiedl, K. H., Vogelaar, B., Bakker, M., & Resing, W. C. M. (2019). The role of cognitive flexibility in young children's potential for learning under dynamic testing conditions. *European Journal of Psychology of Education, 34*, 123–146.
Wu, Y., & Zhou, X. (2009). The P300 and reward valence, magnitude, and expectancy in outcome evaluation. *Brain Research, 1286*, 114–122.
Xu, G., Wen, H., Wei, X., & Mo, L. (2011). The influence of positions of cues on probabilistic category learning. *Acta Psychologica Sinica*, 43(3), 264–273.
[徐贵平, 温红博, 魏晓玛, 莫雷. (2011). 线索呈现位置对概率类别学习的影响. 心理学报, 43(3), 264–273.]
Xing, Q., Sun, H., Zhan, D., Hu, J., & Liu, K. (2017). The effect of executive function on verbal insight

problem solving: behavioral and ERPs studies. *Acta Psychologica Sinica, 49*(7), 909–919.
[邢强，孙海龙，占丹玲，胡婧，刘凯. (2017). 执行功能对言语顿悟问题解决的影响：基于行为与ERPs 的研究. *心理学报, 49*(7), 909–919.]
Zeithamova, D., & Maddox, W. T. (2007). The role of visuospatial and verbal working memory in perceptual category learning. *Memory and Cognition, 35*, 1380–1398.

The Effect of Cognitive Flexibility on Probabilistic Category Learning

FENG Xia[1], FENG Chengzhi[2]
(1School of Education Science, Nantong University, Nantong 226019, China)
([2]Department of Psychology, School of Education, Soochow University, Suzhou 215123, China)

Abstract

Cognitive flexibility is related to one's level of cognitive ability and creativity, and is an important feature of intelligence. With regard to probabilistic cue learning, whether the level of cognitive flexibility has an impact on the learning process in young adults remains to be studied. We addressed these questions by taking advantage of the event-related potentials (ERP) technique in two rule tasks with the same probability properties, which aimed to see how learners' cognitive flexibility promotes the dynamic process of probabilistic category earning, and its underlying neural mechanisms.

We chose the "number-letter task" as the effective tool to assess learners' cognitive flexibility level based on previous research and pilot testing. The participants were ranked according to their switch cost. The first 27% (smaller switch cost) were assigned to the high flexibility group, and the last 27% were assigned to the low group. All participants completed the picture selection task and the coin search task in the EEG environment on two occasions with a two week interval in between. The two tasks had the same probability pairs (0-1/3, 0-2/3, 1/3-2/3, 1-1/3), yet were different in form. Leaning curves for different groups, accuracy, latency, and ERPs at different learning stages were recorded and analyzed for each task.

Behavioral results showed that in these two tasks, learners with high flexibility had a higher rule acquisition rate, although the high and low groups did not show any difference in rule acquisition speed. Learners' cognitive flexibility had cross-task advantages in probabilistic cue rule learning. For the ERP results, in the picture selection task there was a marginally significant difference between the two groups in the amplitude of the P300 component under the condition of preacquisiton-high - probability-reward. The advantage of high flexibility in rule learning was mainly due to the higher efficiency of feedback learning. In the coin search task, there was a significant difference between high and low flexibility groups in the amplitude of the FRN component under the conditions of preacquisiton-expectation and the conditions of postacquisition -unexpectation. Furthermore, only the low flexibility group showed a significant difference between the high and low probability conditions in the amplitude of the P300 component.

In conclusion, the study suggests that learners with high cognitive flexibility have a cross-task advantage in probabilistic category learning, which is mainly due to more efficient feedback learning.

Key words cognitive flexibility, probability, rule learning, feedback-related negativity (FRN), P300